

MATERIALES INGENIERILES: LOS MATERIALES QUE USAN LOS INGENIEROS

(Publicado por primera vez en: Revista Universitaria-UABC, No. 44, octubre-diciembre 2003)

Guadalupe Lydia Alvarez Camacho
Instituto de Ingeniería, UABC

Jesús M. Siqueiros Beltrones
Centro de Ciencias de la Materia Condensada, UNAM

Ilustraciones: Ernesto Santillán

Introducción

El progreso tecnológico se encuentra estrechamente unido al desarrollo de nuevos materiales. Tan es así que clasificaciones como Edad de Piedra y Edad de Hierro se basan en el material principal con que se fabricaban utensilios y herramientas en un periodo histórico determinado. Con el paso del tiempo, la cantidad de materiales disponibles ha ido en aumento. Con el advenimiento de la Revolución Industrial, las máquinas empezaron a ser la base de una nueva economía y esto sigue siendo así hasta nuestros días. Sin embargo, en años recientes las máquinas han sufrido un cambio cualitativo como también lo han sufrido los materiales de interés. Hasta el siglo XIX lo más importante en un material eran sus *propiedades mecánicas*. Hoy en día, la tecnología electrónica que ha transformado el mundo ha llevado el interés fundamental a las *propiedades electrónicas*.

Las propiedades mecánicas de los materiales nos indican qué tan bien soporta un material las fuerzas que se aplican sobre él. A nivel microscópico, estas propiedades son originadas por la forma en que los átomos de un material se enlazan entre sí. En cambio, las propiedades electrónicas de los materiales son originadas por la forma en que los electrones de un material reaccionan frente a una excitación. Entre éstas se clasifican las propiedades eléctricas, magnéticas, ópticas y térmicas, es decir, aquéllas que tienen que ver con los campos eléctricos, magnéticos, electromagnéticos y con el calor. Debe aclararse que el clasificar las propiedades térmicas dentro de las propiedades electrónicas puede ser cuestionable. Como se verá más adelante, no siempre es cierto que las propiedades térmicas estén relacionadas exclusivamente con el comportamiento de los electrones.

La elección de materiales de acuerdo a sus propiedades mecánicas se remonta a los principios de la historia. No obstante, el interés no ha decrecido en lo más mínimo. Cuando nuestros antepasados elegían la piedra como el material con que fabricarían puntas de flecha no estaban haciendo algo muy diferente que el ingeniero que hoy en día elige el material con el que se fabricará el chasis de una nave espacial. La selección de acuerdo a las propiedades electrónicas tuvo, por el contrario, una aparición relativamente reciente. La gran variedad de dispositivos que han transformado nuestra forma de concebir el mundo, no existiría si no fuera por el descubrimiento y el dominio de las propiedades electrónicas.

Las propiedades de los materiales son tantas que sería imposible describir cada una de ellas con claridad. Por esto, a continuación, se dará una breve explicación de las más destacadas, sin que esto implique que el análisis sea exhaustivo. Después se hará una breve revisión de algunas de las categorías de materiales más importantes.

Dureza y tenacidad

Los conceptos de dureza (*hardness*) y tenacidad (*toughness*) son muy fácilmente confundidos a pesar de que tienen significados completamente diferentes. El diamante es el material más duro que existe y sin embargo, no es el más tenaz: si se le da un martillazo se romperá en pedazos, aunque el acero del martillo sea menos duro. Las varillas metálicas que sostienen las edificaciones son muchísimo más tenaces que el diamante, el diamante no podría reemplazarlas aún cuando su dureza sea mucho mayor.

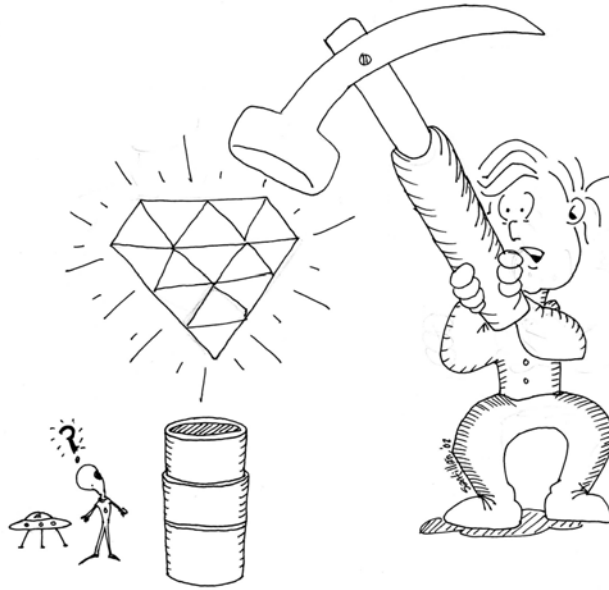


Figura 1: Resulta sorprendente que un material duro pueda ser roto por uno menos duro. La ciencia de materiales puede explicar este fenómeno.

La *dureza* se relaciona con la capacidad que tiene un material de soportar esfuerzos sin deformarse permanentemente. Hay diversas formas de medir la dureza, si bien la mayoría consiste en utilizar un indentador; esto es, un dispositivo que trata de penetrar el material, que podría ser un pequeño balón o una aguja. Por ejemplo, si pretendemos comparar la dureza de un trozo de plastilina con la de un vaso de vidrio, podríamos utilizar un lápiz como indentador. El lápiz penetra sin dificultad la plastilina, demostrando que el lápiz es más duro que la plastilina. Por otra parte, el lápiz no puede atravesar el vaso de vidrio, así que el vidrio es más duro que el lápiz. Del resultado de ambos experimentos también podemos concluir que el vidrio es más duro que la plastilina.

La *tenacidad* tiene que ver con la capacidad que tiene un material para absorber energía sin romperse. Todos los materiales tienen grietas internas que se propagan más rápido mientras menos tenaz sea el material. Cuando el material se deforma con facilidad, es decir, es blando, la porción del material que rodea la grieta se deforma. Este proceso consume energía lo que retarda la propagación de la grieta y consigue que el material sea tenaz. En los materiales más duros, esta deformación no ocurre por lo que las grietas disponen de mucha más energía para propagarse, lo que lleva al material a tener una baja tenacidad.

De lo anterior, pudiera entenderse que entre la dureza y la tenacidad existe una relación inversa; sin embargo, la situación no es tan simple. La propagación de grietas depende de otros factores como, por ejemplo, el tipo de proceso de deformación que ocurre en el material o las dimensiones de la grieta inicial. Sin embargo, sí es posible decir que una dureza extrema y una tenacidad extrema nunca se encontrarán juntas en el mismo material.

Cuando se quiere construir una pieza estructural para una máquina, se requiere que la pieza resista las fuerzas que se apliquen sobre ella. Para propósitos de la máquina, si la pieza se deforma o se rompe el resultado será el mismo: una falla de funcionamiento. Para que sea confiable, la pieza no debe sufrir ningún cambio a partir de su forma original. Si se combina la resistencia a la deformación con la resistencia a la ruptura, se puede definir un concepto práctico denominado *resistencia a la falla*. Por lo general, es más común que los materiales muy tenaces fallen por deformación mientras que los materiales más duros lo hagan por ruptura. Cuando la dureza y la tenacidad son intermedias, cualquiera de las dos fallas puede ocurrir, dependiendo de las circunstancias.

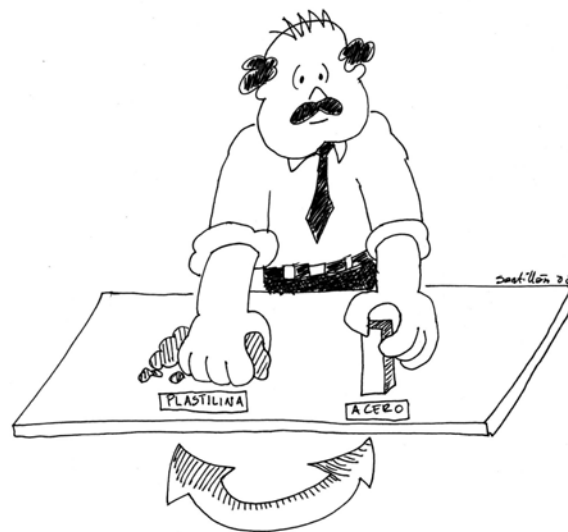


Figura 2: No siempre lo más duro o lo más tenaz es lo más apropiado. El conocimiento de las propiedades de los materiales nos ayuda a tomar la mejor opción para un uso particular.

Como ejemplo, supongamos que dejamos caer al piso un vaso de vidrio, una lata metálica y una figura de plastilina. El vidrio es un material muy duro, aunque poco tenaz, así que veremos como al caer al piso se rompe en muchos pedazos. La plastilina es un material muy blando y muy tenaz, así que la figura no se quebrará pero sí se deformará completamente. Por otra parte, la lata metálica permanecerá casi intacta. Si observamos con detenimiento, tal vez encontremos alguna abolladura, pero lo más probable es que la lata siga siendo utilizable. La combinación de metales de que está hecha la lata no presenta valores extremos de dureza, ni tampoco de tenacidad. Este compromiso entre dureza y tenacidad es lo que consigue que la lata sea el objeto que mejor resiste la caída.

Conductividad eléctrica y térmica

La conductividad eléctrica es una medida de la facilidad con que un material puede transportar la corriente eléctrica. La corriente eléctrica está constituida por partículas cargadas en movimiento. En un material sólido, las únicas partículas cargadas que pueden moverse son los electrones, que

tienen carga negativa. En algunos materiales, los electrones están firmemente enlazados a sus átomos y en otros, pueden viajar libres a través de todo el material. La existencia de electrones libres es un requisito indispensable para que un material sólido pueda permitir el paso de una corriente eléctrica. Cuando hay electrones libres presentes se dice que el material es un conductor eléctrico o simplemente *conductor*. Si los electrones no son libres, será muy difícil establecer una corriente eléctrica. En este caso se dice que el material es un aislante eléctrico o simplemente *aislante*.

Ya que los electrones son partículas de carga negativa, resulta sorprendente encontrar algunos materiales en que la corriente parece ser producida por un flujo de cargas positivas. Se ha demostrado por medio de los conceptos de la mecánica cuántica, que esto no tiene que ver con la existencia de cargas positivas libres, sino con un comportamiento colectivo de los electrones que en ciertos casos, produce este efecto. A estas cargas positivas aparentes se les conoce como *huecos*, ya que generalmente se piensa en ellos como en un lugar que normalmente ocuparía un electrón pero que queda vacío.



Figura 3: La conductividad eléctrica es la medida de la facilidad con que un material puede transportar una corriente eléctrica. En el cuerpo humano, por ejemplo, los portadores de carga son iones disueltos en los líquidos corporales.

La *conductividad térmica* mide qué tan fácil es el transporte de una corriente térmica, esto es, de un flujo de calor. Cuando en un material existen presentes electrones libres, éstos participarán activamente en la conducción de calor. Sin embargo, el flujo de calor puede establecerse por medio de otros procesos. Por ejemplo, en un sólido el calor puede transportarse a través de las vibraciones de los átomos en sus posiciones de equilibrio. De una u otra forma, si el material permite que se establezca un flujo de calor se dice que es un *conductor térmico*. Si, por el contrario, este flujo es muy difícil de establecer se dice que el material es un *aislante térmico*.

Metales

Los metales fueron los primeros materiales que revolucionaron la forma de vivir de los pueblos primitivos. En la naturaleza, rara vez se encuentran en forma pura, por lo que tuvieron que desarrollarse métodos para separarlos de sus óxidos. Hoy en día, siguen siendo una de las categorías de materiales más importante, si no es que la más importante. Los metales resultan

insustituibles en muchas aplicaciones debido a sus peculiares propiedades mecánicas y electrónicas.

Los metales, en su estado natural, son relativamente blandos; es decir, muy fáciles de deformar. Sin embargo, existen tratamientos por medio de los cuales puede conseguirse que aumenten su dureza. A este tipo de procedimientos se les conoce como procesos de *fortalecimiento*. También pueden crearse *aleaciones*; esto es, mezclas de distintos metales y otros elementos que sean más duros que sus componentes originales.

Todo procedimiento que aumente la dureza de un metal, disminuirá necesariamente su tenacidad. Sin embargo, la dureza y tenacidad de la mayoría de las aleaciones se encuentran en el intervalo óptimo. Esta es la razón por la que una lata, fabricada a base de una aleación metálica, resiste mejor la caída que otros objetos más duros o más tenaces. Debido a esto, las aleaciones metálicas se usan sistemáticamente para fabricar los componentes estructurales de la mayoría de las máquinas. Entre estas destaca el acero, una aleación de hierro y carbono con pequeñas cantidades de otros elementos, que ocupa un lugar privilegiado en este ámbito de aplicación.

Los enlaces entre los átomos de los metales son tales que permiten a los electrones moverse libremente a través de todo el material. Por esto, los metales son excelentes conductores de la electricidad y por supuesto, también del calor. Esta es la razón de que los cables que llevan la electricidad a nuestros hogares sean de metal, así como también los disipadores de calor que se utilizan obligadamente en la mayoría de los dispositivos electrónicos.

Cerámicas

Las cerámicas aparecieron en la historia después que los metales y, debido a que nunca existió un periodo específico en que fuera el material más relevante, su importancia no quedó consagrada en una Edad de la Cerámica. La fabricación de ladrillos permitió la construcción de casas que resistían las lluvias y los recipientes de barro cocido, permitieron el almacenamiento de agua y alimentos. Hoy en día, existen muchos nuevos tipos de cerámicas, que destacan debido a sorprendentes propiedades electrónicas.

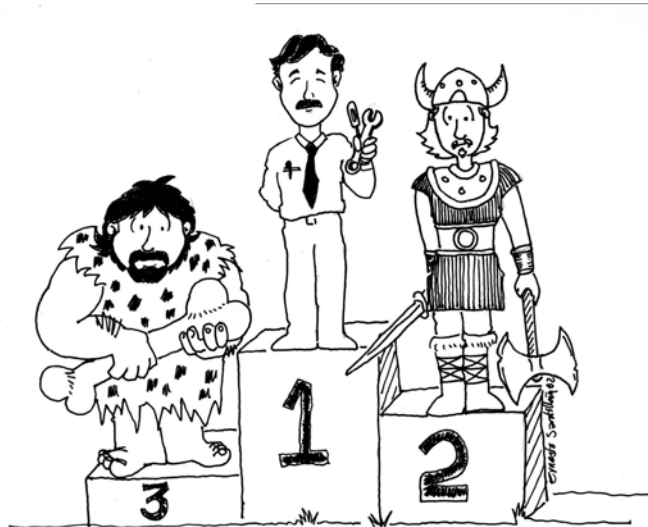


Figura 4: El grado de conocimiento de los materiales es una medida del desarrollo tecnológico de un grupo social. También lo es de la supremacía que éste puede ejercer sobre grupos menos avanzados.

Las cerámicas tienen los valores de dureza más altos que existen. Sin embargo, ya que una dureza extrema implica una muy baja tenacidad, las cerámicas no soportan los golpes y se quiebran con extrema facilidad. Existen aplicaciones donde la resistencia a la deformación es fundamental; por ejemplo, la forma de una figura decorativa tiene valor artístico por lo que no puede permitirse que la pierda. No es de extrañarse que estas figuras casi siempre sean de cerámica, aunque haya que pagar el precio de tener cuidados especiales con ellas puesto que, como todo niño sabe, si llegan a caerse se destruirán por completo.

Otra característica de las cerámicas es que resisten muy bien las altas temperaturas. A temperaturas para las cuales otros materiales ya se encuentran en estado líquido, las cerámicas siguen siendo sólidas y a veces su dureza aumenta. Por esto, todo aquello que deba estar dentro de hornos y chimeneas se fabrica de cerámica.

En décadas recientes se propuso que los motores de automóvil podrían fabricarse a partir de materiales cerámicos para que así las piezas del motor no fallaran cuando ocurriera un sobrecalentamiento. Esta excelente idea no ha podido ponerse en práctica porque la utilización de chatarra como materia prima para la fabricación del acero, reduce los costos de los automóviles. Las cerámicas, al no ser reciclables, incrementarían los costos de fabricación. Sin embargo, algunas piezas específicas de motores ya se han empezado a fabricar de cerámica.

La gran mayoría de las cerámicas son malos conductores de la electricidad. Muchas aplicaciones tecnológicas se derivan de esta propiedad y es común ver piezas de cerámica utilizadas como aislantes eléctricos en las líneas de transmisión urbanas. Sin embargo, existen algunas cerámicas especiales que tienen propiedades de superconductividad, como se verá más adelante. En cuanto a su conductividad térmica, es difícil establecer una regla: algunas cerámicas son malos conductores del calor mientras que otras tienen altísimos valores de conductividad térmica, igualando o incluso sobrepasando a los metales. Para elegir una cerámica de acuerdo a su conductividad térmica, es necesario verificar las propiedades específicas de esa cerámica en particular.

Plásticos

A diferencia de los metales y las cerámicas, los plásticos aparecieron mucho más recientemente. Los plásticos, conocidos con más precisión como *polímeros*, son materiales orgánicos que se obtienen a partir del petróleo. Los plásticos se caracterizan por su poca resistencia a la temperatura. Cuando se someten a altas temperaturas, los *termoplásticos* se derriten, mientras que los plásticos *termofijos* se chamuscan o se queman.

Los plásticos, como grupo, son mucho más blandos que los metales aunque, en lo individual, algunos puedan ser más duros que los metales más blandos. Sin embargo, aunque su tenacidad es alta no alcanza los valores extremos de los metales. Esto es porque el proceso de deformación del material que rodea a la grieta en un polímero es diferente del que ocurre en un metal. De cualquier modo, su tenacidad es razonable por lo que, generalmente, es mucho más fácil deformar un polímero que quebrarlo.

Existen algunos polímeros especiales que son conductores de la electricidad; recientemente hasta se han encontrado algunos con propiedades superconductoras. Sin embargo, la gran mayoría de los polímeros son aislantes eléctricos. En cuanto a su conductividad térmica, los polímeros son mejores aislantes térmicos que las mejores cerámicas. Tanto sus propiedades de aislamiento eléctrico como de aislamiento térmico están limitadas por su poca resistencia a la

temperatura. A bajas temperaturas el mejor aislante será un polímero, pero a altas temperaturas, las cerámicas siempre serán la mejor opción.

En todos aquellos casos en que la resistencia a altas temperaturas no es necesaria, los plásticos han logrado introducirse en todos los ámbitos, desbancando muchas veces a otros materiales más consolidados. Las bolsas del mercado están hechas de *polietileno* y dejaron en el olvido a aquéllas hechas de fibras naturales. El *poliéster* a su vez, compite también con las fibras naturales en la industria del vestido, con bastante éxito. Los polímeros más duros reemplazan a las cerámicas en la fabricación de vasos y platos que no se rompen al caer. Los polímeros más tenaces pueden reemplazar a los metales en la fabricación de tornillos y otros componentes estructurales en máquinas ligeras.

Compositos (*composites*)

Un composito es un material que está formado de dos materiales diferentes, combinados de modo que se puedan aprovechar las propiedades mecánicas ventajosas de cada uno de ellos. No es apropiado, de ningún modo, denominarles compuestos. En química, un compuesto (*compound*) se define como una sustancia que está formada de más de un tipo de átomos; como el agua, que se forma de oxígeno e hidrógeno, o la sal, formada a partir de cloro y sodio. La palabra compuesto contrasta con elemento, que se define como una sustancia formada de un sólo tipo de átomos, como el hidrógeno o el mercurio. Todos los polímeros y cerámicas son compuestos, mientras que los metales puros como la plata o el hierro son elementos.

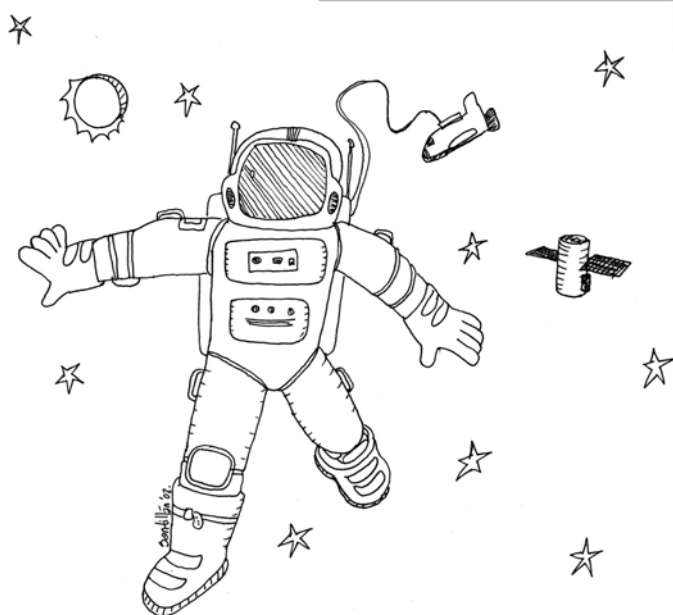


Figura 5: La investigación espacial nos ha dejado, entre otros beneficios, el desarrollo de nuevos materiales capaces de funcionar sin fallas en condiciones extremas como las que se encuentran en el espacio interestelar.

Un composito es algo muy diferente: un ejemplo típico es el plástico reforzado con fibras. Entre estos el más común es la fibra de vidrio (*fiberglass*) Este composito está formado de pequeñas fibrillas de vidrio (*glass fibers*) encapsuladas por medio de una resina de poliéster. Las fibrillas de vidrio son muy duras, pero al doblarse se quiebran con facilidad. El poliéster es muy flexible y fácil de deformar. Cuando los dos materiales se combinan, el plástico que sostiene a las fibrillas evita que éstas se doblen y quiebren, mientras que las fibrillas no permiten que el conjunto se

deforme. De este modo, se consigue un material mucho más resistente a la falla que cada uno de los materiales que lo constituyen. Con fibra de vidrio se fabrican desde carrocerías para automóvil hasta tablas de *surf*. Otro ejemplo de plástico reforzado con fibras es la fibra de carbono que se utiliza para fabricar bicicletas de carreras o raquetas de tenis, debido a que combina una alta tenacidad con un muy bajo peso.

Semiconductores

Un semiconductor es un material cuyo comportamiento no es de aislante ni de conductor. A bajas temperaturas, estos materiales no permiten el paso de la corriente. Sin embargo, al incrementar la temperatura su conductividad se incrementa también, aunque sin llegar nunca a los altos valores que tiene un material conductor.

El semiconductor en que se basa la tecnología electrónica de hoy es el silicio, el material sólido más abundante en la corteza terrestre. Puede encontrarse en forma de óxido en la arena de las playas. Para poder utilizarlo es necesario separarlo del oxígeno y someterlo a un proceso de purificación. La conductividad de un semiconductor purificado puede aumentarse a voluntad por medio de la adición de impurezas. La apropiada selección de la impureza también controla si el material tendrá conductividad por electrones o por huecos.

Los dispositivos semiconductores como el diodo, el transistor, los tiristores, etc., se forman creando semiconductores mixtos en los cuales existen regiones en que la conducción es por electrones y otras en que es por huecos. La interacción entre estos dos tipos de conductividad da lugar a todo tipo de comportamientos útiles, los cuales son la base de la tecnología electrónica.

Superconductores

Se ha descubierto que a bajas temperaturas, algunos materiales tienen una conductividad eléctrica tan grande que en la práctica puede considerarse infinita. Estos materiales se conocen como *superconductores*. Los superconductores no son simplemente conductores extremadamente eficientes, sino que presentan otras propiedades asociadas con su alta conductividad como, por ejemplo, el que los campos magnéticos no los puedan penetrar. Por medio de la mecánica cuántica, se ha demostrado que, en los superconductores, los electrones libres tienen un ordenamiento mayor que el que tendrían en un conductor común y que este ordenamiento es el responsable de sus propiedades especiales.

El fenómeno de la superconductividad ocurre en muchos metales, así como también en algunos polímeros y cerámicas. Es en éstas últimas en donde se ha conseguido que el fenómeno ocurra a temperaturas más altas. Sin embargo, estas temperaturas siguen estando cientos de grados por debajo de la temperatura de congelación del agua por lo que, para sacar provecho de las propiedades superconductoras, siempre es necesario un sistema de enfriamiento adicional. Esto puede ser suficiente para que ciertas aplicaciones no sean económicamente viables.

Debido en parte a los costos que implicaría un equipo de enfriamiento y en parte a que las cerámicas superconductoras son duras y frágiles, no ha podido ponerse en práctica la prometedora idea de fabricar con ellas cables para el alambrado público. Si los problemas asociados se resolvieran, los cables superconductores podrían evitar las grandes pérdidas de energía que ocurren en los cables comunes, reduciendo de este modo los costos de la electricidad doméstica.

Sin embargo, ya que los campos magnéticos son producidos por cargas en movimiento, un material que es extremadamente eficiente para conducir una corriente eléctrica puede usarse para generar elevados campos magnéticos. Es esta capacidad lo que ha llevado a los superconductores a encontrar sus primeras aplicaciones comerciales. Los electroimanes que utilizan algunos equipos médicos sofisticados, como los de resonancia magnética, no son más que bobinas hechas a partir de materiales superconductores.

Ciencia e ingeniería de materiales

Los primeros materiales utilizados por el ser humano se tomaban directamente de la naturaleza, como la madera y la piedra. Posteriormente, se desarrollaron procedimientos más sofisticados que consiguen extraer del mundo natural aquello que éste no nos proporciona directamente. A esta categoría pertenece la tecnología de extracción de metales a partir de sus óxidos o del silicio a partir de la arena. La siguiente etapa consiste en combinar distintos materiales de modo que se puedan manipular sus propiedades en forma consciente y planeada. Ejemplo de esta etapa es la impurificación del hierro para aumentar su dureza o la impurificación del silicio para poder fabricar dispositivos semiconductores.

El proceso por medio del cual se diseñan nuevos materiales se conoce como ingeniería de materiales (*materials engineering*). Los ingenieros que se dedican a esta actividad requieren de firmes conocimientos en el campo de la física y la química. Mientras mayor sea el nivel de sofisticación del material que se esté diseñando, mayor será la necesidad de profundizar en estos campos. El incremento de estos conocimientos se encuentra a cargo de científicos especializados en el estudio de los materiales, quienes estudian los fenómenos físicos y químicos relacionados con sus propiedades. Este campo de la investigación científica se conoce como ciencia de materiales (*materials science*).



Figura 6: La ciencia de materiales es interdisciplinaria. La física, la química, la ingeniería y la biología contribuyen con el ingenio humano al diseño y desarrollo de materiales novedosos y útiles.

Es importante destacar que todos los tipos de ingenieros requerirán conocimientos acerca de los materiales y sus propiedades, aunque no se dediquen a diseñarlos. Un ingeniero que pretenda diseñar ya sea una turbina o un nuevo dispositivo electrónico, se encontrará sin duda con el problema de seleccionar el material más apropiado con que deben fabricarse las distintas piezas que componen su diseño.

Al conjunto de todos materiales que se encuentran a disposición de los ingenieros diseñadores se les conoce como materiales ingenieriles (*engineering materials*). El estudio de los materiales ingenieriles es fundamental para la formación de cualquier ingeniero. Debido a una traducción equívoca, diversos cursos que se imparten en nuestras escuelas y facultades llevan por nombre “ingeniería de materiales” en vez de “materiales ingenieriles”, que sería lo más apropiado. La ingeniería de materiales es un procedimiento complejo que sería fantástico pretender que pudiera asimilarse en un simple curso. Por otra parte, sí es factible hacer una revisión somera de los diferentes tipos de materiales disponibles para aplicaciones en ingeniería, y de las estrategias que deben utilizarse para su selección.

Puede discutirse mucho sobre si es el avance tecnológico el que propicia el desarrollo de nuevos materiales, o si son los nuevos materiales los que promueven este avance. En cualquiera de los casos, el progreso económico de países como el nuestro será imposible si en las escuelas y facultades de ciencias e ingeniería no se le da la atención debida a este campo del conocimiento. Deberíamos ser capaces de producir nuestros propios materiales y no simplemente consumir los que se producen más allá de nuestras fronteras. Quien controla los materiales controla la industria y quien controla la industria controla la economía.

El desarrollo de nuevos materiales es un problema que continúa abierto. El ser humano está muy lejos de haber agotado todas las posibles combinaciones. No necesitamos extraterrestres con poderes mágicos que vengan a regalarnos materiales de propiedades sorprendentes, como los que aparecen con tanta frecuencia en programas sensacionalistas de televisión: los materiales que se crean aquí en la Tierra son ya lo suficientemente espectaculares. Los nuevos materiales no bajan del cielo, se diseñan a base de estudio de las ciencias básicas y de mucho trabajo de ensayo y error. ¿Cuánto más seguiremos esperando para que nuestro país participe en esta empresa fundamental? ¿Esperaremos hasta que sea tarde?

Bibliografía

Rolf. E. Hummel, *Understanding Materials Science: History, Properties, Applications*, Springer-Verlag, 1998

Kenneth G. Budinsky, *Engineering Materials: Properties and Selection*, 5ta edición, Prentice Hall, 1996.

Michael F. Ashby-David RH Jones, *Engineering Materials 1: An introduction to their properties & applications*, Butterworth-Heinemann, 1996